海南岛橡胶林叶面积指数遥感估算模型比较研究

戴声佩[1,2*]，罗红霞[1,2]，郑　倩[1,2]，胡盈盈[1,2]，李海亮[1,2]，李茂芬[1,2]，禹　萱[1,2]，陈帮乾[3]

（1. 农业农村部农业遥感重点实验室，北京 100081；2. 中国热带农业科学院科技信息研究所/海南省热带作物信息技术应用研究重点实验室，海南海口 571101；3. 中国热带农业科学院橡胶研究所，海南海口 571101）

摘　要：叶面积指数（LAI）是描述植被生长状况和冠层结构的一个重要参数，快速获取大面积植被与作物LAI对于生态系统科学研究、农林业生产指导具有十分重要的理论和实践意义。本研究选取海南岛典型热带作物——橡胶树为研究对象，构建基于卫星遥感植被指数的橡胶林LAI估算模型并分析其变化规律。结果表明，相较于归一化植被指数（NDVI）、绿色归一化植被指数（GNDVI）、比值植被指数（RVI）和宽动态范围植被指数（WDRVI）四个指数，增强植被指数（EVI）、土壤调节植被指数（SAVI）、差值植被指数（DVI）和改良土壤调节植被指数（MSAVI）四个指数同LAI之间的相关性较高。构建的基于不同植被指数的橡胶林LAI估算模型（一元线性、指数和对数模型）中，基于EVI指数的橡胶林LAI一元线性估算模型效果最佳，其决定系数R^2为0.69。经验证，该模型估算的橡胶林LAI精度较高，观测和模拟的橡胶林LAI线性拟合R^2为0.67，均方根误差RMSE为0.16，平均相对误差RE为-0.25%，但在橡胶林LAI中值区存在低估现象，同时在LAI高值区和低值区存在一定的高估现象。从空间分布来看，海南岛橡胶林LAI高值区（4.40～6.23）主要分布在海南岛西部儋州、白沙等市县，LAI中值区（3.80～4.40）主要分布在海南岛中部澄迈、屯昌、琼中等市县，LAI低值区（2.69～3.80）主要分布在海南岛东部和南部的定安、琼海、万宁、乐东、三亚等市县。总之，构建的基于EVI指数的橡胶林LAI一元线性估算模型精度较高，克服了NDVI、GNDVI、RVI等植被指数容易出现指数饱和问题，具有较好的科学性和良好的推广应用价值。

关键词：叶面积指数；橡胶林；遥感；估算模型；海南岛

中图分类号：S127　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**202106-SA003

引用格式：戴声佩, 罗红霞, 郑倩, 胡盈盈, 李海亮, 李茂芬, 禹萱, 陈帮乾. 海南岛橡胶林叶面积指数遥感估算模型比较研究[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(2): 45-54.

DAI Shengpei, LUO Hongxia, ZHENG Qian, HU Yingying, LI Hailiang, LI Maofen, YU Xuan, CHEN Bangqian. Comparison of remote sensing estimation models for leaf area index of rubber plantation in Hainan Island[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(2): 45-54. (in Chinese with English abstract)

1　引　言

叶面积指数（Leaf Area Index，LAI）是描述植被生长状况和冠层结构的一个重要参数[1]，它与植被的许多生物、物理过程（如光合作用、蒸腾作用等）有关，也是陆地表面过程模型（如作物生长模型、碳循环模型等）常用的输入参量之一[2]，影响着陆地生态系统的物质和能量循环

收稿日期：2021-06-03　修订日期：2021-06-28

基金项目：农业农村部农业遥感重点实验室开放基金项目（2016005）；海南省自然科学基金面上项目（619MS100，620MS086）

*通讯作者：戴声佩（1986—），男，博士，副研究员，研究方向为农业资源环境遥感。电话：0898-66969285。E-mail：shengpeidai@gmail.com。

过程。快速准确地获取区域乃至全球尺度植被LAI对于生态系统研究具有重要的科学意义。LAI也是农作物、林木和果树等生理生态、良种选育、作物长势、作物产量评估和病害评价研究的一个重要参数[3,4]。LAI通常用于定量表征作物叶片的疏密程度和冠层结构特征，作物生育过程中的LAI序列能反映作物长势动态变化，可用于作物生长诊断和提高作物估产精度[5]。LAI还是林木和林分群体结构合理性的重要标志之一，合理的LAI是充分利用光能、保证林分高产优质的主要条件[6]。林分LAI研究可以为合理栽培和丰产林培育提供理论依据，并成为衡量林分质量的重要指标[7]。测定叶面积的准确与否，直接影响到对林木和林分合理受光群体结构的研究和光能利用率及净同化率的计算等[8]。快速获得大面积作物LAI对于指导农林业生产具有十分重要的实践意义。

目前，LAI测量与估算方法大致可分为直接测量法和间接测量法两类。直接测量法包括格点法、长宽校正法、描形称重法、鲜重打孔法、标准枝法、面积收获法、落叶收集法和面积仪测定法等[9]。间接测量法包括点接触法、消光系数法、经验公式法、光学仪器法和遥感方法[10]，其中遥感方法包含光学模型反演法[11]和统计模型法[12]等。传统的LAI地面直接测量通常存在对作物和植被具有破坏性、耗时耗力、并且获得信息有限、难以扩展到大区域，不能呈面状分布等局限[13]。与传统直接测量方法和光学仪器方法比较，卫星遥感数据具有覆盖面积大、更新周期短、花费相对少等特点和无损、快速、大面积应用等优点，故卫星遥感方法成为无损、快速、大面积估算植被LAI切实可行的实用方法[14，15]。

当前，国内外关于LAI遥感估算研究主要集中在天然森林[12]和草地[11]，以及水稻[5]、小麦[4]、玉米[16]等大宗农作物的研究，极少关注热带作物，如橡胶林、油棕林、木薯、热带果树等LAI的遥感研究[17-20]。虽然胡耀华等[17]研究了海南不同品系胶园的LAI及其变异，并对实生树胶园的最适LAI作了分析；Rusli和Majid[18]开展了小流域橡胶林和油棕林的LAI制图和监测工作；Chen等[19]利用卫星数据估算了海南儋州试验农场橡胶林LAI，但是这些研究范围均只涉及较小空间尺度，尚未扩展到大面积橡胶林LAI遥感估算。

橡胶树（*Hevea brasiliensis*）是天然橡胶生产的主要来源，其广泛种植于热带地区。橡胶种植业不仅是海南农业的支柱产业，也是农民经济收入的重要来源。开展典型热带作物——橡胶树LAI遥感估算对海南岛橡胶种植空间优化、长势监测、产量估算也有重要意义。因此，本研究选取海南岛橡胶林为研究对象，构建基于卫星遥感数据提取的各类植被指数数据和野外观测的橡胶林LAI数据的各类经验估算模型，并评估各类模型的表现，选出最优估算模型，对海南岛橡胶林LAI进行遥感估算，以期为橡胶林长势遥感监测、产量遥感评估提供科学参考。

2 数据与方法

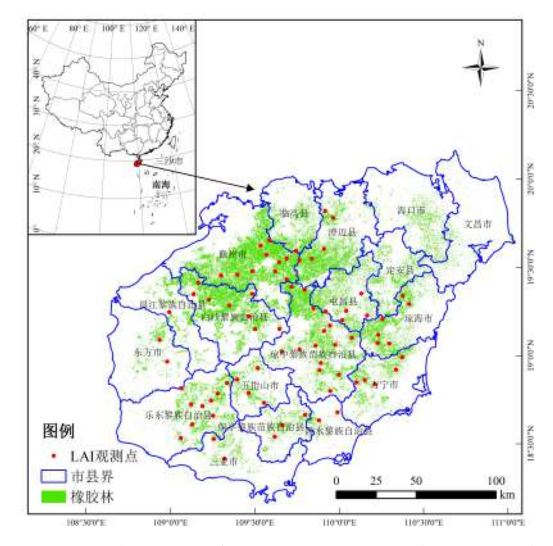
2.1 研究区概况

选择海南岛为研究区，橡胶林分布及LAI观测点如图1所示。海南岛地处18°10′N～20°10′N和108°37′E～111°03′E之间，岛屿轮廓形似一个椭圆形“大雪梨”，长轴呈东北至西南向长约290 km，西北至东南宽约180 km，海岸线总长1944 km，总面积为33,900 km^2，是中国仅次于台湾岛的第二大岛。海南岛地势为中部高、四周低，气候属热带季风海洋性气候，全年暖热，年平均气温高，气温年差较小，雨量充沛，干湿季节明显，光、热、水资源丰富，风、旱、寒等气候灾害频繁。海南岛地表覆盖为热带雨林/季雨林，热带动植物资源十分丰富。海南是中国重要的天然橡胶树种植地区，天然橡胶是海南第一大经济作物。根据2020年海南省统计年鉴数据，截止到2019年底，海南天然橡胶种植面积526,900 ha，占全国种植总面积的46.00%；开割

面积381,300 ha，占全国开割总面积的48.56%；干胶产量330,800 t，占全国干胶总产量的40.85%；干胶产值33.77亿元，占全国干胶产值的41.22%[21]。

2.2 野外实测数据

本研究在海南岛主要植胶地区选择有代表性的典型橡胶树林分样地LAI观测点77个（图1），采用对角线数据采集法，以及手持GPS、LAI-2200实地观测随机样方LAI（图2），从而获得橡胶林观测林分样地LAI及其相关数据。为了与陆地卫星遥感数据空间分辨率保持一致，随机样方的大小设置为30 m×30 m；同时为了分析橡胶林生长最佳时期（8—9月份）的LAI，本研究选择橡胶林LAI观测日期为2017年8月15日—9月15日。此外观测时间选择在每天上午9—12时之间，以便与卫星过境时间相匹配。统计77个橡胶林LAI观测点数据，2017年8—9月LAI平均值为4.33±0.27，最大值为5.12，最小值为3.68。将地面观测LAI样本数据数量随机分成7:3，分别用于LAI估算模型的构建样本（54个）和验证样本（23个）。



注：中国地图基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1697号标准地图制作、海南岛地图基于GS(2019)3333号标准地图制作，底图边界无修改

图1　2015年海南岛橡胶林分布和LAI观测点示意图

Fig. 1 Spatial distribution and LAI observation points of rubber plantations in Hainan Island in 2015

2.3 海南岛橡胶林空间分布数据

本研究使用的海南岛橡胶林空间分布数据来源于中国热带农业科学院橡胶研究所（http://www.catas.cn/xjs/），该数据是利用日本JAXA的PALSAR/PALSAR-2和Landsat等长时序列遥感影像，协同橡胶林物候特征，建立稳定的橡胶林识别算法，获取2015年海南岛橡胶林空间分布信息，总体分类精度>90%[22]。

2.4 遥感数据来源及预处理

本研究选取覆盖研究区范围的2017年8—9月的Landsat 8 OLI时间序列卫星遥感影像23景（表1），并对卫



（a）橡胶林样地Google Earth影像

30 m
30 m

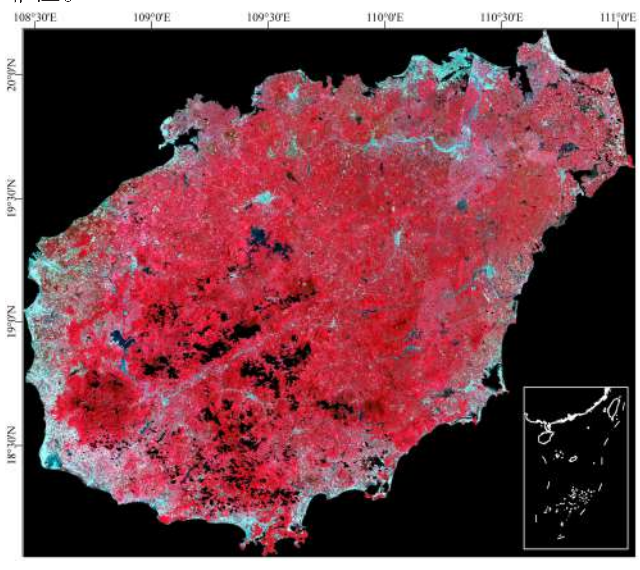
（b）随机样方　（c）橡胶林观测点　（d）LAI 2200

注：图(b)中，绿色矩形为样地内随机样方，浅绿色圆点为随机样方数据采集点

图2　橡胶林野外观测示意图

Fig. 2 Sketch map of rubber plantation LAI field observation

星遥感数据进行几何校正、辐射校正、大气校正等预处理。选用Landsat-8卫星的2、3、4、5、6和7等6个波段参与植被指数计算，影像空间分辨率为30 m。由于海南岛属热带季风海洋性气候，很难获得完全无云或低云的影像。为解决多云覆盖对研究的影响，利用像元级云量提取算法（具体原理参考文献［23］）计算研究时段内每一景影像的云量，结合研究区域特征和季节特征综合评定每一景影像的得分，生成研究区内逐像元云量最小影像（图3），合成用于LAI估算的遥感影像数据，以此克服研究区多云多雨气候特征对LAI估算结果的影响，提高LAI估算的可靠性。



注：影像中黑色部分为云覆盖去除处理之后的结果

图3 基于2017年Landsat-8卫星数据的研究区云量最小合成影像

Fig. 3 Composited Landsat-8 image with minimum cloud cover in 2017 in study area

2.5 遥感植被指数计算

基于以往LAI遥感估算研究中常用的植被指数，本研究中选取了8种卫星遥感植被指数（表2），包括增强植被指数（Enhanced Vegetation Index，EVI）[24]、归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）[25]、绿色归一化植被指数（Green NDVI，GNDVI）[26]、比值植被指数（Ratio Vegetation Index，RVI）[27]、

表1 Landsat卫星遥感数据信息

Table 1 Landsat remote sensing data information.

编号	条带号	行编号	日期	时间
1	123	046	2017年8月11日	10:59:07
2	123	046	2017年9月12日	10:59:12
3	123	047	2017年8月11日	10:59:31
4	123	047	2017年9月12日	10:59:36
5	124	046	2017年8月02日	11:05:14
6	124	046	2017年8月18日	11:05:20
7	124	046	2017年9月03日	11:05:22
8	124	046	2017年9月19日	11:05:25
9	124	047	2017年8月02日	11:05:38
10	124	047	2017年8月18日	11:05:44
11	124	047	2017年9月03日	11:05:46
12	124	047	2017年9月19日	11:05:49
13	124	048	2017年8月02日	11:06:02
14	124	048	2017年9月03日	11:06:10
15	124	048	2017年9月19日	11:06:13
16	125	046	2017年8月09日	11:11:28
17	125	046	2017年8月25日	11:11:32
18	125	046	2017年9月10日	11:11:33
19	125	046	2017年9月26日	11:11:39
20	125	047	2017年8月09日	11:11:52
21	125	047	2017年8月25日	11:11:56
22	125	047	2017年9月10日	11:11:57
23	125	047	2017年9月26日	11:12:03

注：卫星为Landsat 8，传感器为OLI

土壤调节植被指数（Soil Adjusted Vegetation Index，SAVI）[28]、宽动态范围植被指数（Wide Dynamic Range Vegetation Index，WDRVI）[29]、差值植被指数（Difference Vegetation Index，DVI）[30]和改良土壤调节植被指数（Modified Soil Adjusted Vegetation Index，MSAVI）[31]。为减小空间尺度效应，计算植被指数时利用样区中心点及其周围3×3邻域像元的地表反射率的平均值。

本研究中对Landsat 8 OLI卫星遥感数据进行收集、预处理、最小云量合成和植被指数计算均是利用谷歌地球引擎（Google Earth Engine，https://earthengine.google.com/）进行。谷歌地球引擎是Google提供的对大量全球尺度地球科学资料（尤其是卫星数据）进行在线可视化计算

和分析处理的云计算平台，该平台能够存取卫星图像和其他地球观测数据库中的资料，并对这些数据资料进行处理分析，提供了足够的运算能力和高效的运算效率[32]。

表2 植被指数及其计算公式

Table 2 Vegetation index and their formulas

缩写	英文名称	中文名称	计算公式	
EVI	Enhanced Vegetation Index	增强植被指数[24]	$EVI=2.5\times(\rho_{nir}-\rho_{red})/(\rho_{nir}+6.0\rho_{red}-7.5\rho_{blue}+1)$	(1)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	归一化植被指数[25]	$NDVI=(\rho_{nir}-\rho_{red})/(\rho_{nir}+\rho_{red})$	(2)
GNDVI	Green NDVI	绿色归一化植被指数[26]	$GNDVI=(\rho_{nir}-\rho_{green})/(\rho_{nir}+\rho_{green})$	(3)
RVI	Ratio Vegetation Index	比值植被指数[27]	$RVI=\rho_{nir}/\rho_{red}$	(4)
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	土壤调节植被指数[28]	$SAVI=1.5\times(\rho_{nir}-\rho_{red})/(\rho_{nir}+\rho_{red}+0.5)$	(5)
WDRVI	Wide Dynamic Range Vegetation Index	宽动态范围植被指数[29]	$WDRVI=(0.2\times\rho_{nir}-\rho_{red})/(0.2\times\rho_{nir}+\rho_{red})$	(6)
DVI	Difference Vegetation Index	差值植被指数[30]	$DVI=\rho_{nir}-\rho_{red}$	(7)
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	改良土壤调节植被指数[31]	$MSAVI=2\times\rho_{nir}+1-\sqrt{(2\times\rho_{nir}+1)^2-8\times(\rho_{nir}-\rho_{red})}/2$	(8)

2.6 LAI估算模型构建与验证

在分析观测LAI数据与8种遥感植被指数之间的相关性的基础上，利用54个样地观测LAI数据与8种遥感植被指数，基于经验统计方法，构建基于不同植被指数的橡胶林LAI估算模型（一元线性、指数和对数模型），并对模型表现进行评估，并选出最优估算模型。不同模型的表现采用决定系数（Coefficient of Determination，R^2）进行评估和优选。利用选出的最优估算模型估算海南岛橡胶林LAI，获得大面积橡胶林LAI的空间分布，并利用剩余23个观测LAI数据对估算结果进行精度评价和验证。以估算值与观测值之间线性拟合的决定系数R^2、均方根误差（Root Mean Square Error，RMSE）和相对误差（Relative Error，RE）（公式（9）和公式（10））对模型的表现进行验证和评价。

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(M_i-O_i\right)^2}{N}} \tag{9}$$

$$RE=\frac{M_i-O_i}{O_i}\times 100\% \tag{10}$$

其中，N为数据个数；M_i和O_i分别为橡胶林LAI估算值和观测值。

3 结果与分析

3.1 植被指数与LAI的相关性

为了更好地进行估算模型构建，计算植被指数与观测LAI之间的相关系数。由表3可知，EVI、SAVI、DVI、MSAVI同LAI之间的相关性较高，其相关系数分别为0.83、0.81、0.82和0.81，均通过p<0.001显著性水平检验。LAI与NDVI、GNDVI、RVI、WDRVI之间的相关性较低，其相关系数分别为0.61、0.65、0.67和0.65，均通过p<0.01显著性水平检验。

表3 橡胶林8种植被指数与观测LAI相关系数

Table 3 Correlation coefficients between 8 vegetation indices and LAI of rubber plantation

相关系数	EVI	NDVI	GNDVI	RVI	SAVI	WDRVI	DVI	MSAVI
r	0.83**	0.61*	0.65*	0.67*	0.81**	0.65*	0.82**	0.81**

注：*表示通过p<0.01显著性水平，**表示通过p<0.001显著性水平

3.2 估算模型构建与优选

通过构建基于不同植被指数的橡胶林LAI估算模型（一元线性、指数和对数模型）（表4），在一元线性模型中，基于EVI指数的橡胶林LAI

估算模型效果最佳（公式（11）），其决定系数R^2为0.69，高于基于NDVI、GNDVI、RVI、SAVI、WDRVI、DVI和MSAVI指数的估算模型。在指数模型中，基于SAVI指数的橡胶林LAI估算模型效果最佳（公式（24）），其决定系数R^2为0.67，高于基于其他植被指数的估算模型。在对数模型中，基于DVI指数的橡胶林LAI估算模型效果最佳（公式（31）），其决定系数R^2为0.65，高于基于其他植被指数的估算模型。综合比较，选择基于EVI指数的一元线性模型作为橡胶林LAI估算的最优模型，并估算海南岛橡胶林LAI。

表4 基于卫星遥感植被指数的LAI估算模型

Table 4 LAI estimation models based on satellite remote sensing vegetation indices

植被指数	估算模型		R^2	*N*/个
EVI	y=2.2582x+2.8622	（11）	**0.69**	54
	y=3.0762e$^{0.5230x}$	（12）	0.66	
	y=1.3527ln(x)+4.9312	（13）	0.63	
NDVI	y=2.5583x+2.2212	（14）	0.34	54
	y=2.6164e$^{0.6086x}$	（15）	0.36	
	y=1.7281ln(x)+4.6736	（16）	0.31	
GNDVI	y=4.1216x+1.2552	（17）	0.44	54
	y=2.0872e$^{0.9754x}$	（18）	0.46	
	y=2.7651ln(x)+5.1474	（19）	0.42	
RVI	y=0.0645x+3.5703	（20）	0.41	54
	y=3.6154e$^{0.0151x}$	（21）	0.42	
	y=0.5797ln(x)+2.9245	（22）	0.38	
SAVI	y=3.2588x+2.4713	（23）	0.66	54
	y=2.8047e$^{0.7580x}$	（24）	**0.67**	
	y=1.6999ln(x)+5.2991	（25）	0.63	
WDRVI	y=1.2421x+3.8685	（26）	0.38	54
	y=3.8740e$^{0.2940x}$	（27）	0.40	
	y=0.1783ln(x)+4.5408	（28）	0.15	
DVI	y=0.0004x+3.0470	（29）	0.65	54
	y=3.2172e$^{0.00008x}$	（30）	0.65	
	y=1.2697ln(x)−6.0374	（31）	**0.65**	
MSAVI	y=4.9797x+2.3614	（32）	0.66	54
	y=2.7360e$^{1.1563x}$	（33）	0.67	
	y=1.8432ln(x)+6.0540	（34）	0.64	

3.3 估算结果与分析

利用选出的最优估算模型估算海南岛橡胶林LAI，获得大面积橡胶林LAI的空间分布（图4）。经统计，估算的海南岛橡胶林LAI平均值为4.32±0.18，最大值为6.23，最小值为2.69。从空间分布来看，海南岛橡胶林LAI高值区（4.40～6.23）主要分布在海南岛西部儋州、白沙等市县，LAI中值区（3.80～4.40）主要分布在海南岛中部澄迈、屯昌、琼中等市县，LAI低值区（2.69～3.80）主要分布在海南岛东部和南部的定安、琼海、万宁、乐东、三亚等市县。海南岛橡胶林LAI空间分布存在异质性的原因包括以下几个方面：一是由于海南岛橡胶林大部分年龄低于40年[33]，这一年龄段的橡胶树正处于生长旺盛期，生物量大、生产力高，LAI整体也较高；二是研究区年龄小于25年的橡胶林大多分布在海南岛西部儋州、白沙等市县[33]，使得海南岛橡胶林LAI高值区域主要分布在海南岛的西部市县；三是海南岛东部和南部易受台风灾害影响，造成橡胶林损害，导致该区域橡胶林LAI值较低。此外海南岛橡胶林主要种植在海拔100～600 m山坡地，使得其LAI空间分布差异受地形影响较大，分布于山坡地区不同海拔、坡度、坡向的橡胶林接收到的太阳辐射呈现空间差异，导致植被生长受到影响，这也使得海南岛橡胶林LAI呈现空间差异。

3.4 精度验证与分析

比较估算和观测的橡胶林LAI结果（图5）可知，橡胶林LAI估算模型精度较高，模型估算结果基本处于95%置信区间，观测和模拟的橡胶林LAI线性拟合决定系数R^2为0.67，通过$p<0.001$显著性水平检验，均方根误差*RMSE*为0.16，平均相对误差*RE*为−0.25%。但在橡胶林LAI中值区（3.80～4.40）存在低估现象，同时在LAI高值区（>4.40）和低值区（<3.80）存在一定的高估现象，这可能是由于海南岛橡胶林总体处于生长旺盛期（年龄小于25年的面积比例为52.54%[33]），其植被指数和LAI整体处于较高值，造成其区分度较低，使得橡胶林LAI估算出现偏差。

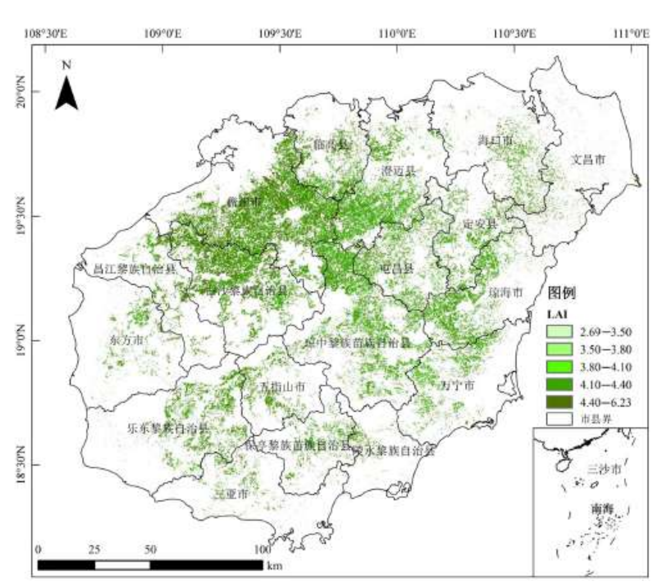
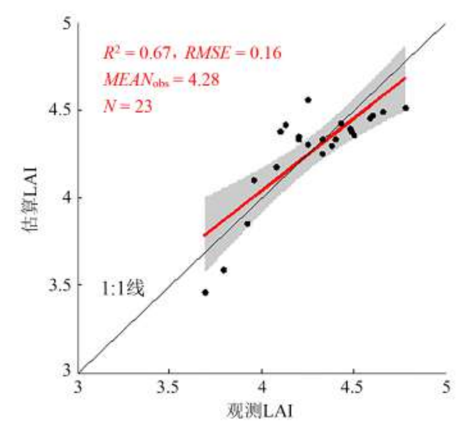


图4 基于EVI指数和一元线性模型的研究区橡胶林LAI空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of rubber plantation LAI in the study area based on EVI index and linear model



注：灰色阴影部分为95%置信区间

图5 研究区橡胶林LAI估算结果验证

Fig. 5 Validation results of estimate rubber plantation LAI in the study area

4 讨论与结论

4.1 讨论

海南岛地处热带，该区域多云多雨，覆盖研究区的光学影像数据质量往往不佳，不能满足研究需求。本研究中，针对海南多云多雨的热带气候特征，采用像元级最小云量影像合成方法，获取Landsat时间序列不同波段合成的纯净影像，克服了研究区多云多雨气候特征对LAI估算结果的影响，提高了LAI估算的可靠性。基于遥感大数据平台谷歌地球引擎构建的遥感数据集[32]，为LAI估算研究与应用提供了充足的数据基础。

橡胶林是典型的热带作物，其树形高大、植被茂密、生产力高。而在植被茂密、生产力高的热带地区遥感研究中，单一植被指数往往无法准确表示作物的生长情况，容易出现指数饱和问题[34]，如NDVI、GNDVI、RVI等植被指数采用非线性拉伸的方式增强了近红外和红光波段反射率的对比度，导致其对高植被区具有较低的灵敏度。本研究中，基于EVI指数构建橡胶林LAI估算模型，较好地解决了指数饱和问题，这是由于EVI指数中红光和近红外波段的范围设置更窄，不仅提高了对稀疏植被探测的能力，而且减少了水汽的影响，同时，引入了蓝光波段，对大气气溶胶的散射和土壤背景进行了矫正，可以稳定地反映热带地区植被的情况。经检验，构建的基于EVI指数的橡胶林LAI估算模型精度也较高，具有较好的科学基础和实用性。但在模型推广应用过程中，一方面需要更大空间覆盖范围的地面样点验证，另一方面还需要进行长时间序列的地面样点观测，以满足未来LAI时空反演和时空分析需求。

LAI遥感估算方法主要包含光学模型反演和统计模型2种。光学模型反演法是基于植被的双向反射率分布函数，是一种建立在辐射传输模型基础上的模型，LAI作为输入变量，采用迭代的方法来反演LAI。这种方法的优点是有物理模型基础，不受植被类型的影响，然而由于有些模型过于复杂，反演非常耗时，且反演估算LAI过程中有些函数并不总是收敛的，从而限制了光学模型反演方法的使用和发展[11]。统计模型法主要是从遥感图像数据中提取植被指数与野外实测LAI建立关系模型，进而估算植被LAI。常用的植被指数有EVI和NDVI等，这种方法在不同植被类型，如森林、草地等的LAI与植被指数的函数关系不同，在使用时需要重新计算、拟合。但

由于该模型方法参数输入单一，计算简单[14,15]，因此，本研究也采用此方法进行橡胶林LAI的遥感估算，也取得了较好的效果。

综上，未来需要充分利用遥感云计算平台计算优势，结合多源遥感数据，充分发挥不同数据源的组合优势，发展更高精度的估算模型，如辐射传输模型、机理模型、深度学习模型等，提高橡胶林等热带作物LAI估算精度，为橡胶林长势遥感监测、产量遥感评估提供科学参考。

4.2 结论

本研究通过构建基于卫星遥感植被指数的橡胶林LAI估算模型，实现了海南岛橡胶林LAI遥感估算。结果表明，相较于NDVI、GNDVI、RVI和WDRVI指数，EVI、SAVI、DVI和MSAVI指数同LAI之间的相关性较高。构建的基于不同植被指数的橡胶林LAI估算模型（一元线性、指数和对数模型）中，基于EVI指数的橡胶林LAI一元线性估算模型效果最佳（公式（11）），其决定系数R^2为0.69。经验证，该模型估算的橡胶林LAI精度较高，观测和模拟的橡胶林LAI线性拟合R^2为0.67，*RMSE*为0.16，*RE*为−0.25%，但在橡胶林LAI中值区存在低估现象，同时在LAI高值区和低值区存在一定的高估现象。从空间分布来看，海南岛橡胶林LAI高值区（4.40～6.23）主要分布在海南岛西部儋州、白沙等市县，LAI中值区（3.80～4.40）主要分布在海南岛中部澄迈、屯昌、琼中等市县，LAI低值区（2.69～3.80）主要分布在海南岛东部和南部的定安、琼海、万宁、乐东、三亚等县市。本研究构建的基于EVI指数的橡胶林LAI一元线性估算模型精度较高，克服了NDVI、GNDVI、RVI等植被指数容易出现指数饱和问题，具有较好的科学性和良好的推广应用价值。

参考文献：

[1] FANG H, BARET F, PLUMMER S, et al. An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications[J]. Reviews of Geophysics, 2019, 57(3): 739-799.

[2] TURNER D, COHEN W, KENNEDY R, et al. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(1): 52-68.

[3] CHEN J, CIHLAR J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 153-162.

[4] 夏天, 吴文斌, 周清波, 等. 冬小麦叶面积指数高光谱遥感反演方法对比[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 139-147.
XIA T, WU W, ZHOU Q, et al. Comparison of two inversion methods for winter wheat leaf area index based on hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 139-147.

[5] 康婷婷, 居为民, 李秉柏. 水稻叶面积指数遥感反演方法对比分析[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(5): 366-371.
KANG T, JU W, LI B. Comparative analysis of remote sensing inversion methods for rice leaf area index[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(5): 366-371.

[6] 朱春全, 雷静品, 刘晓东, 等. 不同经营方式下杨树人工林叶面积分布与动态研究[J]. 林业科学, 2001, 37(1): 46-51.
ZHU C, LEI J, LIU X, et al. The distribution and seasonal change of leaf area in poplar plantations managed in different ways[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(1): 46-51.

[7] 刘志理, 戚玉娇, 金光泽. 小兴安岭谷地云冷杉林叶面积指数的季节动态及空间格局[J]. 林业科学, 2013, 49(8): 58-64.
LIU Z, QI Y, JIN G. Seasonality and spatial pattern of leaf area index of a spruce-fir forest at the valley in Xiaoxing'an Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(8): 58-64.

[8] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(5): 537-541.
WANG X, MA L, JIA Z, et al. Research and application advances in leaf area index (LAI)[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(5): 537-541.

[9] 朱旭珍. 三种不同方法估算森林叶面积指数的比较研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
ZHU X. A comparative study of three different methods for estimating forest leaf area index[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2014.

[10] 王修信, 孙涛, 朱启疆, 等. 林地叶面积指数遥感估算方法适用分析[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4612-4619.
WANG X, SUN T, ZHU Q, et al. Assessment of different methods for estimating forest leaf area index from

remote sensing data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (16): 4612-4619.

[11] 柳艺博, 居为民, 朱高龙, 等. 内蒙古不同类型草原叶面积指数遥感估算[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5159-5170.
LIU Y, JU W, ZHU G, et al. Retrieval of leaf area index for different grasslands in Inner Mongolia prairie using remote sensing data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5159-5170.

[12] 昝梅, 李登秋, 居为民, 等. 新疆喀纳斯国家自然保护区植被叶面积指数观测与遥感估算[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4744-4757.
ZAN M, LI D, JU W, et al. Measurement and retrieval of leaf area index using remote sensing data in Kanas National Nature Reserve, Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013 33(15): 4744-4757.

[13] 郭志华, 向洪波, 刘世荣, 等. 落叶收集法测定叶面积指数的快速取样方法[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1200-1209.
GUO Z, XIANG H, LIU S, et al. Sampling method for rapid measurement of leaf area index by leaf litter collection in deciduous forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(5): 1200-1209.

[14] WOODGATE W, JONES S, SUAREZ L, et al. Understanding the variability in ground-based methods for retrieving canopy openness, gap fraction, and leaf area index in diverse forest systems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 205: 83-95.

[15] LIU Z, WANG C, CHEN J, et al. Empirical models for tracing seasonal changes in leaf area index in deciduous broadleaf forests by digital hemispherical photography[J]. Forest Ecology and Management, 2015, 351: 67-77.

[16] 姚延娟, 范闻捷, 刘强, 等. 玉米全生长期叶面积指数收获测量法的改进[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 189-194.
YAO Y, FAN W, LIU Q, et al. Improved harvesting method for corn LAI measurement in corn whole growth stages[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26 (8): 189-194.

[17] 胡耀华, 伍业纲, 王钊, 等. 关于巴西橡胶树林叶面积指数的研究[J]. 热带作物学报, 1981, 2(2): 35-43.
HU Y, WU Y, WANG Z, et al. A study on the leaf area index of *Hevea brasiliensis* stand[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 1981, 2(2): 35-43.

[18] RUSLI N, MAJID M. Monitoring and mapping leaf area index of rubber and oil palm in small watershed area[C]// 8th International Symposium of the Digital Earth (ISDE 8). Bristol, United Kingdom: IOP Publishing Ltd., 2014, 18: ID 012036.

[19] CHEN B, WU Z, WANG J, et al. Spatio-temporal prediction of leaf area index of rubber plantation using HJ-1A/1B CCD images and recurrent neural network[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 102: 148-160.

[20] 陈帮乾, 吴志祥, 杨川, 等. 海南儋州地区橡胶林叶面积指数月动态研究[J]. 热带农业科学, 2015, 35(11): 1-6, 11.
CHEN B, WU Z, YANG C, et al. Monthly dynamics of leaf area index of rubber plantation in Danzhou, Hainan Island, China[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2015, 35(11): 1-6, 11.

[21] 海南省统计局, 国家统计局海南调查总队. 海南省统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
Hainan Provincial Bureau of Statistics, Hainan Investigation Team of National Bureau of Statistics. Hainan statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.

[22] CHEN B, LI X, XIAO X, et al. Mapping tropical forests and deciduous rubber plantations in Hainan Island, China by integrating PALSAR 25-m and multi-temporal Landsat images[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 50: 117-130.

[23] 李睿. 基于Google Earth Engine的桂林市土地利用时空变化分析[D]. 南昌: 东华理工大学, 2019.
LI R. Spatial-temporal analysis of land use change in Guilin city based on Google Earth Engine[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.

[24] HUETE A, DIDAN K, MIURA T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1-2): 195-213.

[25] ROUSE J, HAAS R, SCHELL J, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS[C]// Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium. Washington DC, USA: NASA Special Publication, 1974, 1: 309-317.

[26] GITELSON A, MERZLYAK M. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(12): 2691-2697.

[27] PEARSON R, MILLER L. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie[C]// 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE 8). Michigan, USA: Environment Research Institute of Michigan, 1972, 45: 7-12.

[28] HUETE A. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295-309.

[29] 黄健熙, 侯裔焯, 苏伟, 等. 基于GF-1 WFV数据的玉米与大豆种植面积提取方法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 164-170.
HUANG J, HOU Y, SU W, et al. Mapping corn and soybean cropped area with GF-1 WFV data[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 164-170.

[30] TUCKER C. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.

[31] QI J, CHEHBOUNI A, HUETE A, et al. A modified soil adjusted vegetation index[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 48(2): 119-126.

[32] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18-27.

[33] CHEN B, XIAO X, WU Z, et al. Identifying establishment year and pre-conversion land cover of rubber plantations on Hainan Island, China using Landsat data during 1987—2015[J]. Remote Sensing, 2018, 10(8): 1240.

[34] OLIVAS P, OBERBAUER S, CLARK D, et al. Comparison of direct and indirect methods for assessing leaf area index across a tropical rain forest landscape[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 177: 110-116.

Comparison of Remote Sensing Estimation Models for Leaf Area Index of Rubber Plantation in Hainan Island

DAI Shengpei[1,2*], LUO Hongxia[1,2], ZHENG Qian[1,2], HU Yingying[1,2], LI Hailiang[1,2], LI Maofen[1,2], YU Xuan[1,2], CHEN Bangqian[3]

（1. *Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing* 100081, *China*; 2. *Institute of Scientific and Technical Information*, *Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Key Laboratory of Applied Research on Tropical Crop Information Technology of Hainan Province, Haikou* 571101, *China*;3. *Rubber Research Institute*, *Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences*, *Haikou* 571101, *China*）

Abstract: Leaf area index (LAI) is an important index to describe the growth status and canopy structure of vegetation, is of great theoretical and practical significance to quickly obtain LAI of large area vegetation and crops for ecosystem science research and agricultural & forestry production guidance. In this study, the typical tropical crop rubber tree in Hainan Island was selected as the research area, the LAI estimation model of rubber plantation based on satellite remote sensing vegetation indices was constructed, and its spatiotemporal variation was analyzed. The results showed that, compared with correlations between LAI and the indices of normalized difference vegetation index (NDVI), green NDVI (GNDVI), ratio vegetation index (RVI) and wide dynamic range vegetation index (WDRVI), correlations were higher between LAI and the indices of enhanced vegetation index (EVI), soil adjusted vegetation index (SAVI), difference vegetation index (DVI) and modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). Among the LAI estimation models based on different vegetation indices (linear, exponential and logarithmic models), the linear estimation model based on EVI index was the best, and its coefficient of determination (R^2) was 0.69. The accuracy of LAI estimation model was high. The linear fitting R^2 of observed and simulated LAI was 0.67, the root mean square error (*RMSE*) was 0.16, and the average relative error (*RE*) was −0.25%. However, there was underestimation in the middle value and overestimation in the high and low value area of LAI. The high LAI values (4.40—6.23) were mainly distributed in Danzhou and Baisha in the west of Hainan Island, the middle LAI values (3.80—4.40) were mainly distributed in Chengmai, Tunchang and Qiongzhong in the middle of Hainan Island, and the low LAI values (2.69—3.80) were mainly distributed in Ding'an, Qionghai, Wanning, Ledong and Sanya in the east and south of Hainan Island. In summary, the linear estimation model for rubber plantation LAI based on EVI index obtained high accuracy, and has good values of popularization and appliance.

Key words: leaf area index (LAI); rubber plantation; remote sensing; estimation model; Hainan Island